УДК 532.529

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ МИКРОПУЗЫРЬКОВЫХ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СРЕД В ГЛАДКИХ ТРУБАХ

Б.В. Бошенятов

Институт прикладной механики РАН. г. Москва
E-mail: iam@ipsun.ras.ru

Приведены характеристики газожидкостных пузырьковых течений в гладких горизонтальных трубах при микроскопических диаметрах пузырьков (от 10 до 80 мкм) и объемных газосодержаниях от 0 до 0,5 %. Показано, что закон подобия Рейнольдса соблюдается лишь для турбулентных течений; переход к турбулентному режиму происходит при минимальном критическом числе Рейнольдса; для описания ламинарных и переходных режимов течений кроме числа Рейнольдса необходимо привлечение дополнительных критериев, связанных с относительным размером пузырьков.

Исследование пузырьковых газожидкостных потоков имеет большое практическое значение ввиду их широкого распространения в процессах химической, нефтяной, микробиологической и других отраслях промышленности. Однако пузырьковые режимы течений при размерах пузырьков менее 1 мм, из-за трудностей их получения, до сих пор остаются малоизученными. В работе [1] исследовались течения в вертикальных трубах при диаметрах (d) пузырьков от 0,1 до 1 мм. При d<0,5 мм и числах Рейнольдса меньше 5000 были обнаружены режимы течений с аномально высокими значениями гидравлических сопротивлений. При этом ламинарных режимов не наблюдалось даже при числах Рейнольдса меньше 500. Позднее, в работе [2] было показано, что величина коэффициента трения, при одном и том же числе Рейнольдса и объемном газосодержании, зависит от размеров пузырьков.

Результаты первых исследований микропузырьковых газожидкостных сред (МГС), d<0,1 мм, и потоков в гладких горизонтальных трубах были доложены автором на III Всесоюзной конференции по проблемам турбулентных течений, организованной академиком В.В. Струминским (2–4 сент. 1986 г., г. Донецк), они приведены в работе [3]. Здесь же даны результаты более поздних исследований и их обсуждение.

1. Исследованиям пузырьковых потоков в горизонтальных трубах препятствует процесс разделения смеси, из-за всплытия пузырьков, на две раздельные фазы. Чтобы этого не произошло, необходимо соблюдать условие:

$$\frac{\tau_L}{\tau_D} = \frac{Lg}{18\nu_1^2 \mathrm{Re}_1} d^2 < 1, \qquad (1)$$

где τ_L – время движения МГС вдоль измерительной трубки длиной L; τ_D – время всплытия пузырька на расстояние, равное диаметру измерительной трубки D; g – ускорение силы тяжести; ν_1 – коэффициент кинематической вязкости жидкости; $\mathrm{Re}_1=DV/\nu_1$ – число Рейнольдса, вычисленное по средне-расходной скорости потока в трубке; V – среднерасходная скорость потока.

Условия эксперимента: поток горизонтальный; числа Рейнольдса Re_1 от 600 до 4300; использовалось две измерительные трубки – D=4,04 и 8,53 мм, L/D=345 и 150, соответственно; диаметр пузырьков от 10 до 80 мкм (наибольшее количество d=40 мкм); τ_L/τ_D=0,1...0,3; объемные газосодержания φ=0...0,005.

МГС получали методом извлечения газа из пересыщенного раствора в жидкости [4]. Параметры потока для каждого опыта, в зависимости от размеров измерительной трубки, выбирались из условия (1).

Схематический чертёж установки дан на рис. 1.

Уникальность конструкции установки заключается в том, что объем питающей трубы (1), в которой приготовляется МГС, связан с большим объемом опорного бака (2) через кольцевую щель. При этом большой объем воды в баке (около 400 л) выполняет функцию термостата, служит стабилизатором напора МГС в течение эксперимента и является опорным при измерении газосодержания МГС в трубе (1) по разности уровней в сообщающихся сосудах: трубе (1), наполненной МГС до уровня (H+ΔH) и баке (2), имеющим уровень воды Н с известной плотностью. Газосодержание МГС определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{\Delta H}{\Delta H + H}. \qquad (2)$$

Разность уровней ΔH измеряется микрометрическим координатным устройством (5). Момент контакта жидкого уровня в МГС с краем иглы координатного устройства определяется цифровым универсальным измерительным прибором, работающим в режиме измерения сопротивления цепи. Абсолютная погрешность измерения объемного газосодержания φ этим методом оценивается не хуже 10^{-4}.

В каждом эксперименте измерялись следующие параметры: H – высота уровня воды в баке; (H+ΔH) – высота уровня столба МГС в питающей трубке; h – напор смеси в испытательной трубке (4); T – температура воды в баке; Q – объем МГС, натекающей в мерный стакан в течение одного опыта; t – продолжительность одного опыта.

Используя эти данные, вычислялись: коэффициент сопротивления трубки λ потоку МГС, числа Рейнольдса и объемное газосодержание МГС:

$$\lambda = {2\Delta PD}\Big/{L\rho V^2},\ \Delta P = g\rho(h + \Delta H - {kV^2}\big/{2g}),$$

$$V = {4Q}\Big/{t\pi D^2},\ \rho = \rho_1(1-\varphi),$$

$$\mathrm{Re}_1 = {VD}\big/{\nu_1},\ \mathrm{Re} = {VD}\big/{\nu}, \qquad (3)$$

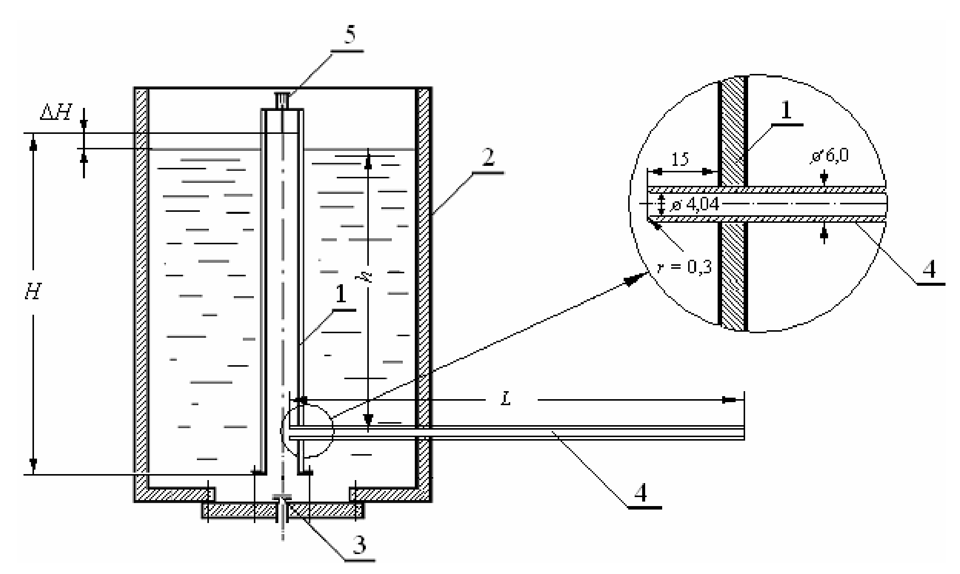


Рис. 1. *Установка для исследования МГС в горизонтальных трубах: 1) объём для МГС, 2) бак с водой, 3) генератор микропузырей, 4) горизонтальная трубка для испытаний, 5) микрометрическое координатное устройство*

где ΔP – перепад давления на измерительной трубке; k – постоянный коэффициент, учитывающий потери давления на входном участке измерительной трубки: k=1,4 – для ламинарного и k=2,7 – для турбулентного потоков [5]; g – ускорение силы тяжести.

2. Уже в первых экспериментах (1986 г.) с МГС нами были получены результаты качественно отличные от данных для более крупных пузырей [1, 2], в частности, при числах Рейнольдса меньших 2000, как и в однофазных потоках, в трубке имел место ламинарный режим течения МГС. Кроме того, ни в одном опыте не было зафиксировано, как в работе [1], аномально высоких коэффициентов сопротивления трубки при числах Рейнольдса меньших 5000.

Следует подчеркнуть, что наши эксперименты проводились при тех же газосодержаниях смеси. Единственным отличием было уменьшение размеров пузырьков (и горизонтальность потока).

При числах Рейнольдса от 5000 до 30000 наши данные по измерениям коэффициента сопротивления трубки совпали с результатами работ [1, 2]. В этом случае имеет место развитый турбулентный поток и все измерения (в диапазоне изменения размеров пузырьков от 10...20 мкм до 1 мм) ложатся на одну кривую, соответствующую классическому закону Блазиуса.

Более детальные исследования ламинарных и переходных течений МГС в гладких горизонтальных трубках приведены на рис. 2, где нанесены результаты измерений коэффициента сопротивления трубки в зависимости от числа Рейнольдса для разных газосодержаний МГС.

На рис. 2 приведены также: теоретическая кривая (I) для ламинарного потока $\lambda = \frac{24}{\mathrm{Re}_1}$ и закон сопротивления Блазиуса $\lambda = \frac{0,316}{\mathrm{Re}_1^{1/4}}$ для турбулентных однофазных потоков.

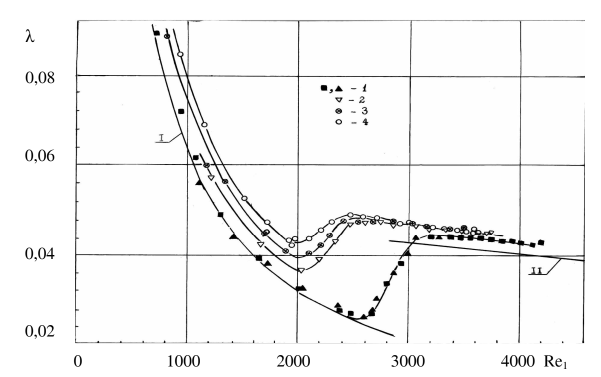


Рис. 2. *Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления МГС в гладкой горизонтальной трубке от числа Рейнольдса и объемного газосодержания смеси: 1) φ=0, 2) φ=2,3·10^{-3}, 3) φ=3,7·10^{-3}, 4) φ=5,0·10^{-3}. Расчет для однофазного потока по формуле: I – Пуазейля, II – Блазиуса*

Прежде всего, для проверки правильности методики измерений и обработки данных, были проведены исследования на однофазной жидкости –отстоявшейся водопроводной воде. Эти измерения необходимы и для того, чтобы зафиксировать относительные изменения характера течения при переходе от однофазного потока (воды) к двухфазному потоку МГС.

На рис. 2 черными треугольными и квадратными метками показаны результаты экспериментов на чистой (φ=0) отстоявшейся водопроводной воде. Видно, что на ламинарном режиме измерения практически точно совпадают с теоретической кривой (I). При числах Re_1>3200 экспериментальные данные ложатся несколько выше классического закона Блазиуса для турбулентных течений. Как выяснилось из прямых измерений перепада давления ΔP, см. формулу (3), это расхождение связано с неточностью определения (по литературным данным) постоянного коэффициента (k=2,7) для данного случая.

В экспериментах на чистой воде коэффициент трения (рис. 2), имеет минимальное значение при Re=Re*=2500. В этом случае струйка из горизонтальной измерительной трубки бьёт далеко – положение струи – 1 на рис. 3.

При Re>Re*, в потоке возникают случайные турбулентные "пробки". Когда турбулентная "пробка" выходит из измерительной трубки, струя воды занимает положение – 2 (рис. 3); когда поток ламинарный – вновь возвращается в положение – 1, т.е. в переходном от ламинарного к турбулентному режиму струйка воды на выходе из трубки колеблется между положениями 1 и 2.

С увеличением числа Рейнольдса струя жидкости все чаще оказывается в положении – 2 и, наконец, при числе Re>3200 – поток полностью становится турбулентным, струя устойчиво находится в положении – 2.

Таким образом, измеренное нами на чистой воде критическое число Рейнольдса Re* в 1,25 раза больше чем минимальное критическое число Рейнольдса Re**=2000 в гладких трубах. Известно, что переход к турбулентному режиму течения в трубах при числе Re**=2000 имеет место лишь в случаях, когда возмущения потока на входе в измерительную трубку больше некоторой пороговой величины. Многочисленными экспериментами доказано, что при числах Re<2000 однофазный поток в трубе всегда ламинарный, при этом внутри потока гасятся любые (по амплитуде) возмущения.

Тот факт, что на чистой воде зафиксировано число Рейнольдса перехода Re*=1,25Re** свидетельствует о малом уровне начальных возмущений на входе в измерительную трубку.

Результаты исследований микропузырьковых двухфазных потоков в той же трубке нанесены на график (рис. 2) светлыми точками.

Из рис. 2 также видно, что форма кривых не отличается друг друга для различных значений объёмного газосодержания, и все они подобны кривой, которая была получена для чистой воды.

Однако минимальное значение коэффициента трения (начало перехода к турбулентному режиму) для всех кривых, относящихся к МГС, имеет место при числе Re=Re**=2000, в отличие от Re=Re*=2500 – для чистой воды.

Таким образом, микропузырьки (даже в малых концентрациях) достаточно сильно возмущают (перемешивают) "струйки тока" в трубке, обеспечивая переход от ламинарного к турбулентному потоку при минимальном критическом числе Рейнольдса. Этот вывод подтверждается и непосредственным фотографированием подкрашенной струйки тока методом Рейнольдса.

Необходимо отметить, что режимы течений МГС в трубе (ламинарный, турбулентный и переходный) легко различаются друг от друга не только по характеру зависимости коэффициента гидравлического сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса, но и, как и в случае однофазной жидкости, – по виду струйки МГС, вытекающей из измерительной трубки (рис. 3). Смена режимов течения МГС в трубке контролировалась этим простым методом в каждом эксперименте.

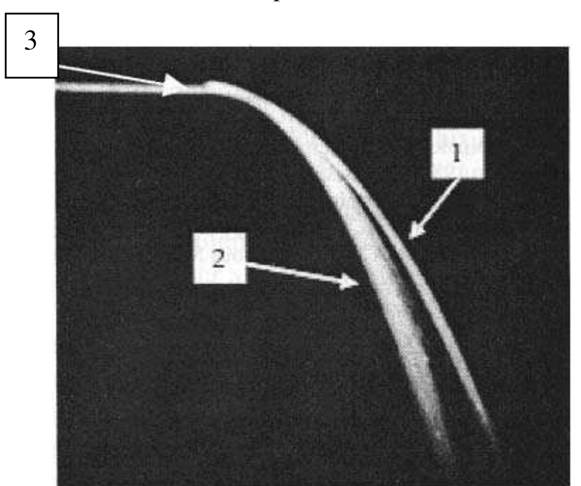


Рис. 3. *Положения струйки воды или МГС на выходе из измерительной трубки на переходном режиме от ламинарного к турбулентному потоку. Снимок сделан на длительной выдержке – видны крайние положения пульсирующей струйки: 1) ламинарный режим потока, 2) турбулентный режим, 3) конец измерительной трубки*

Обратим наше внимание ещё на один важный эффект, который демонстрируют течения микропузырьковых газожидкостных сред в гладких трубках при ламинарном и переходном режимах потока.

Выше было показано, что присутствие микропузырей в потоке, даже в малых количествах вносят достаточно сильные возмущения. Этих возмущений достаточно не только для того, чтобы сдвинуть переход от ламинарного к турбулентному режиму до минимального критического числа Рейнольдса. Эти возмущения (пульсации) осуществляют при ламинарном течении дополнительный перенос импульса поперёк потока. За счет этого профиль скорости на стенке трубы становится более наполненным, чем при ламинарном течении однофазной жидкости, и как следствие, мы наблюдаем более высокие коэффициенты трения на стенке.

Если график, рис. 2, перестроить в координатах $\lambda=f(\mathrm{Re})$, где λ и Re вычислено на основании эффективных параметров МГС [4], то расслоение по величине газосодержания останется. Тогда вся доля этого расслоения будет обусловлена поперечным переносом импульса за счёт возмущений, которые вносят в ламинарный поток мельчайшие пузырьки воздуха. С увеличением объемного газосодержания при том же числе Рейнольдса наблюдается увеличение коэффициента гидравлического сопротивления трубки.

По всей вероятности, на величину поперечного переноса импульса влияет не только величина объемного газосодержания, но и размер пузырьков. В работе [1] возмущения, вносимые пузырями, настолько мощные, что ламинарный режим течения становится неотличимым от "турбулентного", хотя стати-

стические характеристики этого режима течения, безусловно, должны иметь отличия от развитого турбулентного потока. Косвенным подтверждением изложенного является то, что при развитом турбулентном потоке в трубке (в нашем случае при числах Рейнольдса большее 2500, а для более крупных пузырей, исследованных в работе [1], при числах Re>5000) одно- и двухфазные мелкопузырьковые и МГС потоки практически не отличимы друг от друга и описываются в безразмерных координатах единой кривой (в данном случае законом Блазиуса).

Таким образом, подобие Рейнольдса для микропузырьковых газожидкостных потоков в гладких трубах соблюдается лишь в турбулентной области течений. Для описания ламинарных и переходных течений необходимо привлечение дополнительных безразмерных критериев, связанных с относительным размером пузырьков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдуков А.П., Валукина Н.В., Накоряков В.Е. Особенности течения газожидкостной пузырьковой смеси при малых числах Рейнольдса // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1975. – № 4. – С. 137–141.
2. Валукина Н.В., Козьменко Б.К., Кашинский О.Н. Характеристики мелкопузырьковой смеси при течении в вертикальной трубе // Инженерно-физический журнал. – 1979. – Т. 36. – № 4. – С. 695–699.
3. Bosheniatov B.V. Measurement of parameters of two-phase flow with very small gas bubbles in horizontal tubes // Intern. Conf. on the Methods of Aerophys. Research: Proc. Pt. IV. – Novosibirsk, 2004. – P. 81–86.
4. Бошенятов Б.В. Гидродинамика микропузырьковых газожидкостных сред // Известия Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 6. – С. 156–160.
5. Прантль Л., Титьенс О. Гидро- и аэромеханика. – М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1935. – Т. II. – 283 с.

УДК 504.064(4)